

コンクリートの劣化・自己修復に影響する自然環境の評価に関する研究 会員外○ 佐々木智和^{*1}
正会員 浜 幸雄^{*2}
同 桂 修^{*3}
同 谷口 円^{*3}

1. 材料施工—2. モルタル・コンクリートの物性

自己修復コンクリート マイクロクラック コンクリート内部温度 コンクリート内部相対湿度 等価積算温度

1. はじめに

環境保護や経済性の観点から今後新たに建築される建築物については、優良なストックとして維持していくために長期にわたる高い耐久性と信頼性の確保が求められている。また、産業廃棄物最終処分場の確保の問題から火力発電所から排出されるフライアッシュの有効利用が大きな課題となっている。

従来、耐久性向上の方策はコンクリートを高強度化することにより劣化作用の抑制を目指している。しかし、供用期間中に生じるマイクロクラックの影響により耐凍害性が著しく低下することや中性化が促進されることが報告され^[1]、必ずしも十分な効果が得られていない。

長期間にわたり乾燥収縮や凍害によって発生する微細なひび割れを、コンクリート自ら修復することが可能となれば、信頼性と耐久性の高いコンクリートを得ることができる。そこで、鉱物組成と粒度を調整したセメントとフライアッシュを適切に配合し、コンクリート内部で長期にわたって計画的に反応を起こすことにより、乾燥収縮や凍害による微細ひび割れを修復する「自己修復コンクリート」の研究開発が行われている。

本論文では自己修復コンクリートの開発を目的として、まず、コンクリートの劣化と自己修復性能について検討を行った。次に、自然環境下におかれるコンクリートの劣化および修復環境を明らかにするために、温湿度センサを埋め込んだコンクリート供試体を屋外暴露し、コンクリート内部の温湿度を測定するとともに、気象因子から推定する方法を提案する。

2. コンクリートの劣化と自己修復性能に関する検討

2.1 実験計画および方法

実験計画を表1に示す。使用したコンクリートは、登別産陸砂(表乾密度 2.69 g/cm³, 粗粒率 2.70)、白老産砕石(表乾密度 2.67 g/cm³, 最大寸法 20 mm)を用い、水セメント比 50%、目標スランプ 18 cm の nonAE コンクリートである。なお、セメントは、N50 および FA50 では普通ポルトランドセメント($\rho=3.16$)を、HL50 では早強ポルトランドセメント($\rho=3.13$)と低熱ポルトランドセメント($\rho=3.24$)を重量比 7 対 3 の割合で混合して用い

た。また、FA50 では細骨材の一部を容積比で 20 vol. % フライアッシュに置換した。コンクリートの調査表を表2に示す。

強度増進性状の確認は、 $\phi 10 \times 20$ cm の円柱供試体を用いて材齢 3 日、7 日、28 日、91 日および 365 日目に圧縮強度を測定した。なお、養生方法を 20°C 封緘養生とした。

凍害劣化後の自己修復性能の検討は、 $10 \times 10 \times 40$ cm の角柱供試体を用い、初期、劣化後、修復後に各性状試験として促進中性化試験およびひび割れ本数測定を行なった。なお、4 週 20°C 水中養生後 4 週 20°C RH60% 気中養生したものを初期性状、その後に促進試験による凍結融解作用で相対動弾性係数が 75% 程度になったものを劣化後性状、さらに 30°C RH60% の恒温恒湿室中においてコンクリート上面に水を滞留した状態で 3 ヶ月間養生を行ったものを修復後性状とした。

コンクリートに凍結融解作用を加える方法は、RILEM スラブ試験法^[2]とし、凍害劣化の兆候が見られない試験体については、さらに JIS A 1148 に準じて凍結融解試験を行った。

促進中性化試験は JIS A 1153 に準じて行い、ひび割れ観察は松村ら^[3]の方法に準じて、測線上を横切るマイクロクラックの本数を計測し、単位長さあたりのひび割れ本数を求めた。

表1 実験計画表

記号	W/C (%)	AIR (%)	備考	試験体寸法 (cm)	測定項目
N50	50	1	OPC	10×10×40	動弾性係数 中性化速度 ひび割れ本数
FA50			OPC+FA20%骨材置換		
HL50			早強+低熱=7:3	$\phi 10 \times 20$	圧縮強度

表2 調査表

記号	W/C (%)	AIR (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位容積重量 (kg/m ³)					
				セメント			細骨材	粗骨材	FA
				普通	早強	低熱			
N50	50	1	206	411	-	-	802	952	-
FA50			206	412	-	-	623	975	120
HL50			200	-	280	120	203	975	-

Evaluation of Natural Condition influence on Deterioration and Self-Healing of Concrete

SASAKI Tomokazu et al.

2.2 実験結果および考察

(1) 強度増進性状

強度増進性状を図1に示す。自己修復コンクリートのプロトタイプ (FA50、HL50) は、水和反応の遅い低熱ポルトランドセメントやフライアッシュを用いたため強度発現の遅れが懸念されたが、材齢 28 日目では普通コンクリート (N50) と同等の強度発現を示し、91 日目以降の長期材齢での強度増進も大きく、実用上問題ないことが明らかになった。

(2) コンクリートの劣化と自己修復性能

初期養生後、凍結融解作用後および修復養生後の各性状試験時における相対動弾性係数の変化を図2に示す。N50 ではスラブ試験法後に水中凍結融解試験を行ったが、相対動弾性係数はほぼ 100% のまま推移した。プロトタイプでは凍結融解作用により 70% 程度まで低下したが、その後の修復養生により FA50 が 90% 程度に、HL50 が 100% 程度に回復している。

各性状試験での促進中性化試験による中性化速度係数の算出結果を図3に示す。なお、中性化速度係数は、ルート t 則が成立するものとして求めた。中性化速度係数は、相対動弾性係数に変化が見られなかった N50 ではいずれの性状試験時においてもほとんど変わらない。プロトタイプでは劣化後性状試験で健全な初期性状試験より大きくなるものの、修復後性状試験で劣化後性状試験の半分程度になる。

顕微鏡観察による表面のひび割れ本数の測定結果を図4に示す。なお、単位長さあたりのひび割れ本数は、測線上を横切るひび割れ本数の測定結果を測定長さで除して求めた。単位長さあたりのひび割れ本数は、初期性状試験ではいずれの試験体とも 0.01 (本/mm) 以下である。劣化後性状試験では FA50 および HL50 については初期性状試験より増加し、N50 については初期性状試験と同程度である。また、修復後性状試験では、FA50 の試験体で劣化後性状試験時の半分程度となり、HL50 の試験体で 1/3 程度となった。水中凍結融解により発生したひび割れは写真1に示すように、粗骨材界面のひび割れ同士を結ぶネットワーク状になっているのに対し、修復後

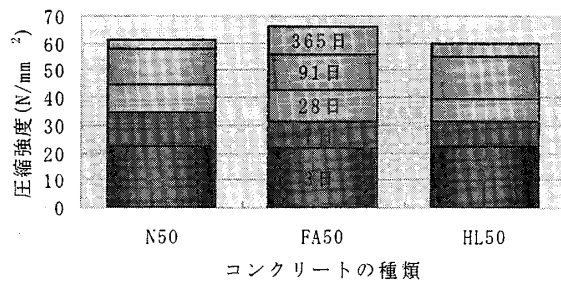


図1 強度増進性状

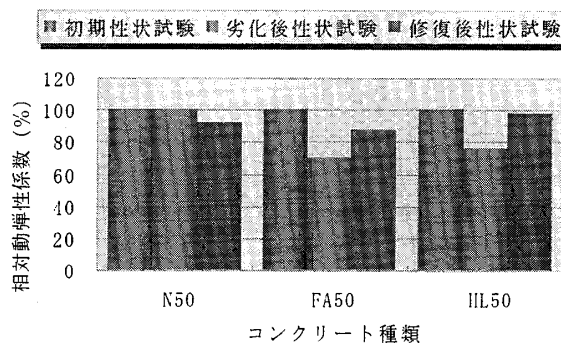


図2 相対動弾性係数の変化

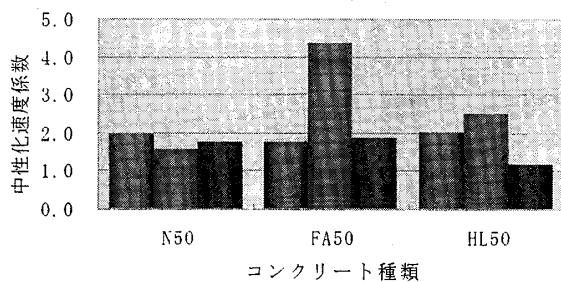


図3 中性化速度係数の変化

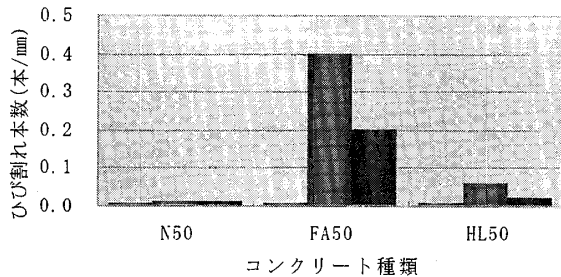


図4 単位長さあたりのひび割れ本数の変化

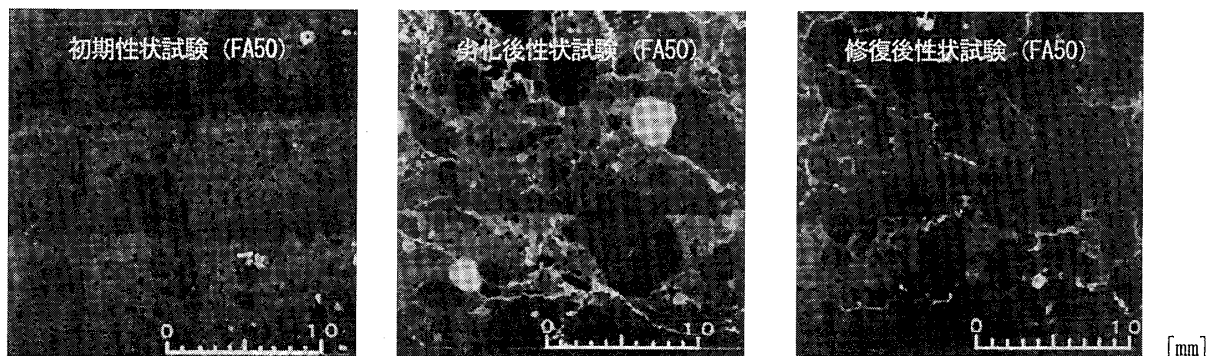


写真1 コンクリート表面のひび割れ観察

は粗骨材界面のひび割れは残っているものの、それを結ぶひび割れが閉塞している。

フライアッシュの添加およびセメント鉱物の割合を調節した供試体では、修復養生を行うことにより、相対動弾性係数が回復、中性化速度係数が低下およびひび割れ本数が減少し、自己修復効果が認められた。

3. 自己修復性能に影響する自然環境の評価

3.1 実験計画および方法

実験計画表を表3に示す。写真2に示すように、実構造物を想定した南向き壁およびスラブ部材を札幌、旭川、室蘭の3地点で屋外暴露し、コンクリート内部の温度および相対湿度をコンクリート表面から2mm、10mm、50mmの位置に埋設した高分子温湿度センサを用いて1時間ごとに測定した。測定は2004年10月16日からの約1年間である。

使用したコンクリートは、前述の普通ポルトランドセメント、登別産陸砂、白老産砕石を用い、水セメント比50%、スランブ18cmのnonAEコンクリートを標準とし、室蘭の壁部材では緻密さによる影響を把握するために、水セメント比40%および60%のコンクリートを加えた。コンクリートの調合表を表4に示す。

3.2 実験結果および考察

週平均温度の経時変化の一例を図5に示す。スラブ部材の一部の測定期間で温湿度センサの不具合と考えられる変動が見られるが、壁部材、スラブ部材ともにコンクリート内部の温度は外気温よりやや高くなっている。また、表面からの深さによる温度変化はほとんどない。

週平均相対湿度の経時変化の一例を図6に示す。なお、今回用いた温湿度センサは、0°C以下の温度では低い相対湿度を示す^[4]ことを考慮して、ここでは温度が0°C以上の期間の湿度で週平均相対湿度を算出している。相対湿度の変化は、深さ2mmではいずれの供試体とも外気の湿度の変化に迅速に対応しており、雨水や雪解け水の影響を受けやすく変動幅が大きい。深さ50mmでは、壁部材で風の影響により湿度の低下が早いのに対し、スラブ部材で雪解けが進む春先頃まで99%RHとほぼ飽水状態のまま推移し、その後徐々に低下していく。また、スラブ部材は、雨水や雪解け水を滞留することから雪解けの進む春先に相対湿度の上昇が見られる。

コンクリート内部の温湿度と水セメント比の関係を図7に示す。コンクリート内部の温度および湿度に水セメント比の影響は認められない。

表3 実験計画表

想定部材	W/C (%)	暴露地	供試体寸法 (cm)	測定項目
壁	40	室蘭	10×20×20	温度
	50	室蘭, 札幌, 旭川		
	60	室蘭		
スラブ	50	室蘭, 札幌, 旭川		相対湿度

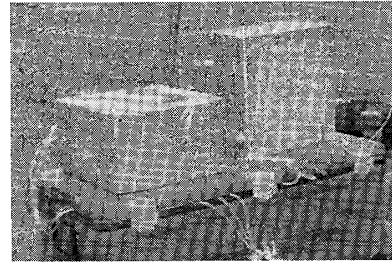


写真2 暴露状況 (札幌)

表4 調合表

W/C (%)	目標スランブ (cm)	目標AIR (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位容積重量 (kg/m ³)		
				セメント	細骨材	粗骨材
40	18	1	219	547	651	952
50			206	411	802	952
60			201	334	881	952

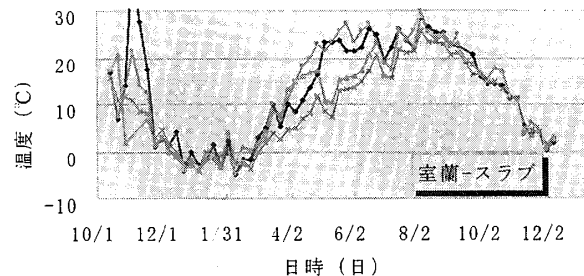
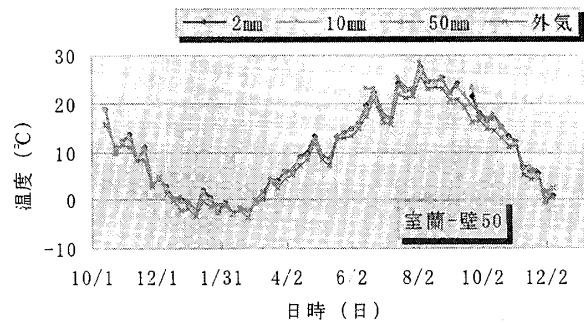


図5 週平均温度の変化 (室蘭)

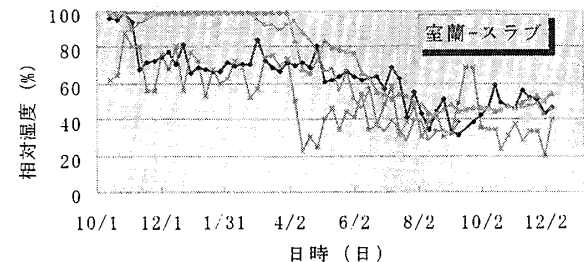
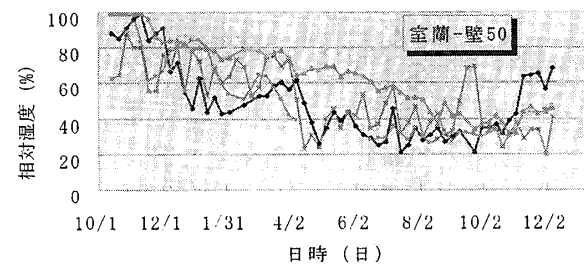


図6 週平均相対湿度の変化 (室蘭)

4. コンクリート内部温湿度予測手法の検討

4. 1 コンクリート内部温度の予測

(1) 富板による推定式

コンクリート内部の毎時温度を予測する試みは、これまでに富板ら^[5]によって行われている。富板のコンクリート温度推定式は、茨城県つくば市で屋外に暴露したコンクリート供試体の水平面・南垂直面の表面温度を計測し、これを外気温、水平面日射量、風向風速の気象要素から重回帰分析を行い、次式で示す実験式を導いている。

$$T_{cS90} = 1.09T + 3.62S_{H90}(1 + 0.00146W_{(S)}) + 0.636W_{(S)} - 1.06 \quad (1)$$

$$T_{cH} = 1.05T + 5.18S_{H}(1 - 0.0106W) + 0.592W - 1.17 \quad (2)$$

ここに、 T_c : コンクリート表面温度の毎時値

T : 外気温 (°C)

S_H : 日射量 (MJ/m²/hr)

W : 風速 (m/s)

添字、 H : 水平面

$S90$: 南垂直面

(2) 熱収支式の提案

日射エネルギー、熱伝達および熱貫流など物体に熱移動が生じない場合、物体の温度は外気温と等しくなる。しかし、物体の温度と外気温に差があると熱伝達および熱貫流が起こる。また、太陽から日射エネルギーを受けると日射面の温度が上昇することで、温度の高いほうから低いほうへ熱が移動する。そこで、この伝熱過程に着目して、コンクリート温度の毎時値をコンクリートおよび積雪表面の熱収支により次のように表わした。

$$a_i J_i A + Q_{i-1} = A(\theta_{i-1} - \theta_i)(K_0 + K) + Q_i \quad (i=0, 1, \dots, n) \quad (3)$$

ここに、 a_i : 日射面の日射吸収率

J : 日射量 [W/m²]

A : 日射面の面積 [m²]

Q : 固体の熱量[W]

θ_n : 固体の温度[K]

θ_0 : 外気温[K]

K_0 : 熱伝達率 [W/m²·K]

K : 熱貫流率 [W/m²·K]

4. 2 推定温度と実測温度の対応

富板推定式および熱収支式による推定温度と前述の深さ 10 mmの測定温度の関係を表 5 に示す。RMSE は毎時の計算による推定温度と実測温度の誤差を一旦 2 乗してから期間平均して平方根をとった値で、予測誤差の大きさを示す指標である。なお、気象データは各暴露地近傍の気象観測所の測定結果^[6]を用いた。

全期間での実測温度と計算による推定温度の対応について見ると、熱収支式は富板推定式より相関係数が高く、RMSE が小さくなり非常に良い対応を示している。しかし、12 月～3 月では両式ともにその他の期間より相関係数が低く、RMSE が大きい。これは、富板式ではつくば

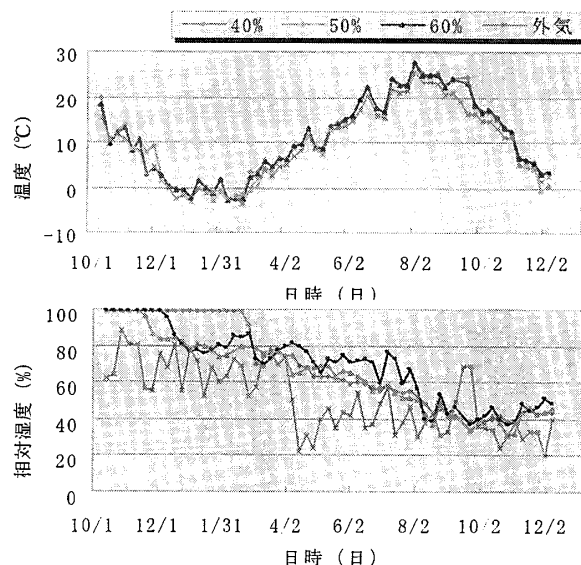


図 7 水セメント比の違いによる温湿度の変化 (50 mm)

表 5 コンクリート内部の実測温度と推定温度の関係

暴露地	測定部材 推定方法 検証指数	壁部材				スラブ部材			
		富板式		熱収支式		富板式		熱収支式	
		相関係数	RMSE	相関係数	RMSE	相関係数	RMSE	相関係数	RMSE
札幌	9～11月	0.939	3.04	0.971	2.28	0.925	4.87	0.971	3.78
	12～3月	0.736	3.80	0.787	3.36	0.522	5.25	0.630	4.28
	4～6月	0.929	3.02	0.982	1.94	0.941	5.43	0.995	3.62
	7～8月	0.882	2.89	0.972	2.05	0.900	4.38	0.980	3.06
	全期間	0.957	3.26	0.974	2.55	0.945	4.83	0.971	3.70
	最低温度 最高温度	0.978 0.928	2.38 4.21	0.983 0.953	1.70 4.39	0.967 0.963	2.68 7.96	0.973 0.973	2.60 5.35
旭川	9～11月	0.920	3.28	0.982	1.56	0.881	4.44	0.952	2.87
	12～3月	0.774	4.77	0.929	2.47	0.692	5.42	0.842	3.33
	4～6月	0.957	2.64	0.993	1.07	0.946	4.10	0.978	3.01
	7～8月	0.930	2.27	0.988	0.97	0.857	4.54	0.931	3.28
	全期間	0.959	3.58	0.989	1.75	0.944	4.77	0.975	3.17
	最低温度 最高温度	0.992 0.922	1.85 3.13	0.998 0.981	0.81 2.34	0.978 0.960	2.96 7.61	0.990 0.969	1.50 4.64
室蘭	9～11月	0.919	3.88	0.958	2.57	0.889	5.82	0.896	4.71
	12～3月	0.653	4.18	0.731	3.82	0.707	5.35	0.765	3.68
	4～6月	0.961	3.54	0.976	3.52	-	-	-	-
	7～8月	0.883	2.88	0.957	2.46	0.688	5.28	0.527	6.92
	全期間	0.942	3.82	0.962	3.13	0.924	5.43	0.921	4.91
	最低温度 最高温度	0.971 0.900	2.64 2.62	0.967 0.912	2.74 4.94	0.966 0.956	3.86 7.32	0.973 0.968	3.18 4.22

※-は温度センサの不具合による計測不能のためデータなし

市での実験結果をもとにした実験式で雪の影響が考慮されていないこと、熱収支式では積雪がある場合に積雪表面での熱収支を計算しているが、気象観測所と暴露地での積雪量に差があり、根雪になる 12 月頃までと雪解けが進む春先に温度誤差が大きくなったためである。また、どちらの式とも物体が凝固および融解する際の凝固熱および潜熱の影響を考慮していないため、図 8 に示すように 0°C 付近での温度誤差が大きい。一方、日最高温度および日最低温度の対応は、図 9 に示すように富板推定式では日最高温度でばらつきが大きく、熱収支式では最高温度および最低温度ともに適切に推定されている。

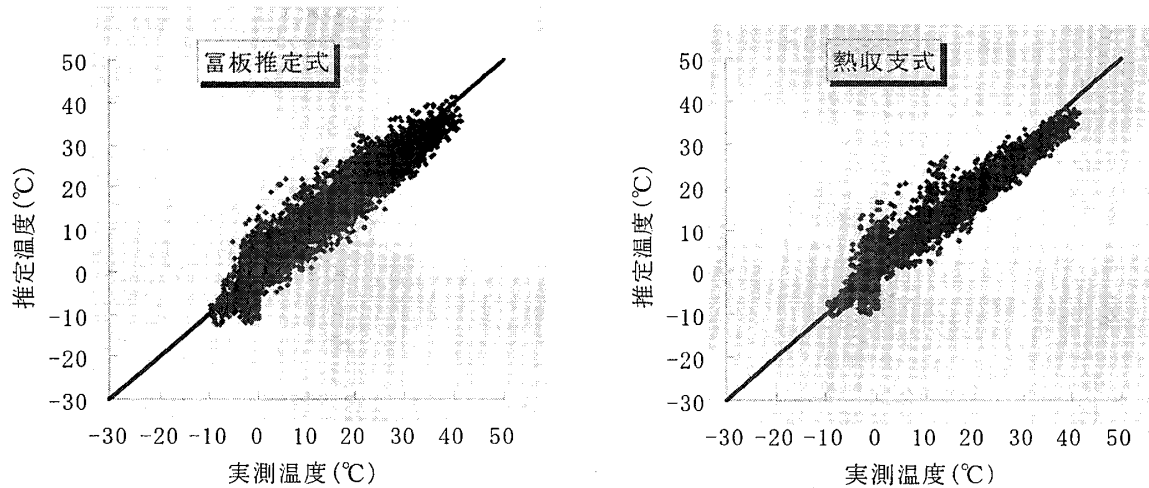


図7 実測温度と推定温度の毎時値の対応 (札幌壁)

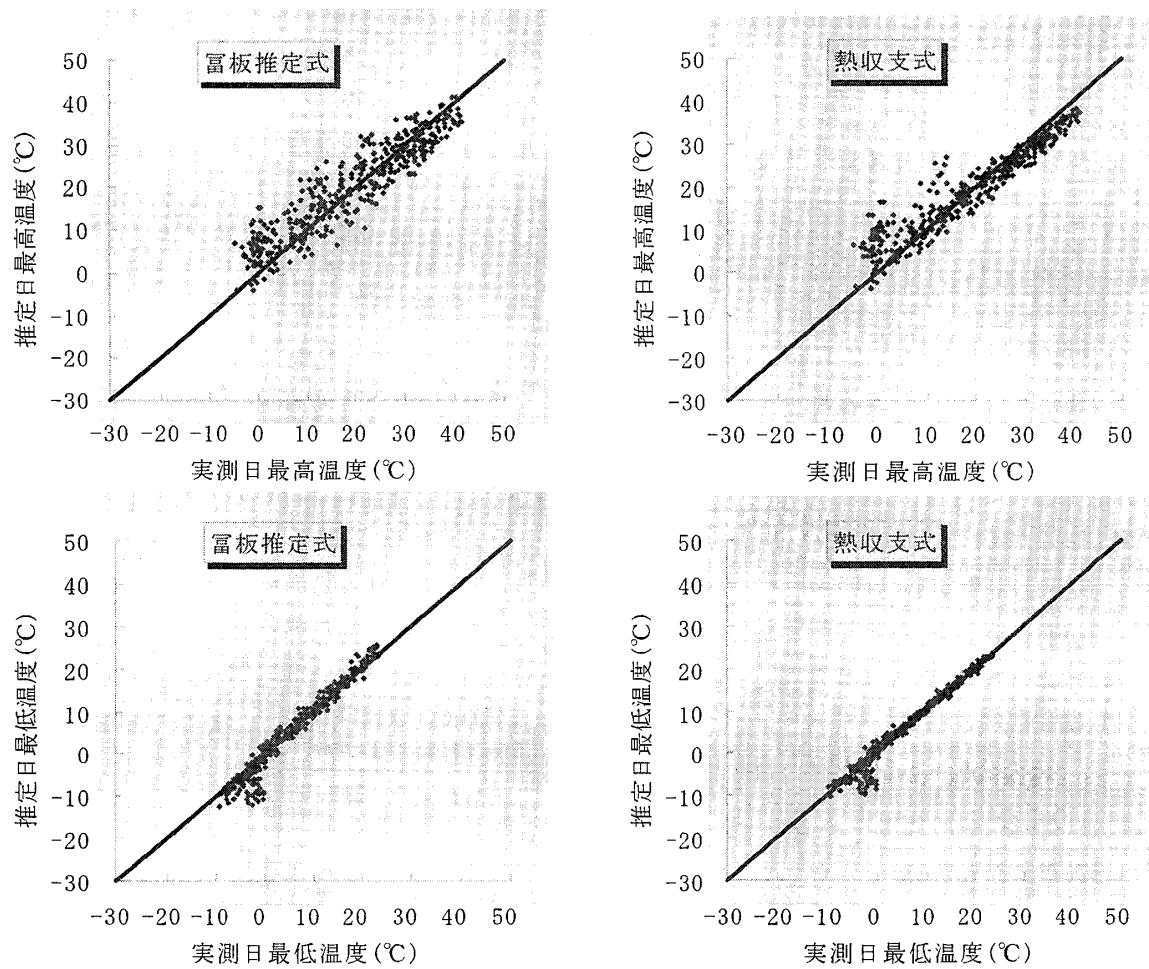


図8 実測温度と推定温度の日最高温度および日最低温度の対応 (札幌壁)

5. 等価積算温度を用いた促進試験条件の提案

現在我が国でコンクリートの強度管理を行う際には、次式で表わされる積算温度が広く用いられている。

$$M = \sum(\theta z + 10) \quad (4)$$

ここに、M：積算温度 (° D・D)

z：材令(日)

θz ：材令 z 日における日平均気温または日平均コンクリート温度 (°C)

しかし、積算温度では凍結や乾燥状態が持続した場合に、同じ積算温度でも強度はかなり小さくなるのが指

摘されている^[7]。そこで、須藤ら^[8]は水の化学ポテンシャルの変化に着目し、温度・乾燥・凍結がセメントの反応速度に及ぼす影響を明らかにしている。さらに、乾燥の影響を化学ポテンシャルの低下として表わすことにより乾燥状態での反応速度定数を算出する方法を提案し、得られた反応速度定数から凍結および乾燥状態に対応する等価積算温度式を示している。

$$M_e = 30 / (k_{20} / k_T) \quad (5)$$

ここに、 M_e ：等価積算温度 (° D・D/日)
 k_{20} ：養生温度 20°Cでの反応速度定数
 k_T ：養生温度 T°Cでの反応速度定数

自然環境下でのコンクリートの修復環境は、前述の暴露したコンクリート内部の温湿度結果を用いて等価積算温度を算出することにより、定量化することができると思われる。

本研究では 4 月～10 月をコンクリートの修復期間と想定して、温湿度データから算出した各地域の積算温度および等価積算温度を表 6 に示す。なお、センサの不具合によりデータが欠落している部分については、残りのデータを用いて直線補間によりデータを修正した。各地域の積算温度はコンクリート内部、外気ともに同程度であるのに対し、等価積算温度は若干のばらつきが見られるが、これは気象条件の違いによりコンクリート内部の乾燥状態に大きな差が生じたことが影響している。

本研究の自己修復コンクリートは、鉄筋までのかぶりコンクリートに発生するマイクロクラックの修復を意図としており、コンクリート内部 50 mm 程度までを修復範囲と考えている。そこで、コンクリート内部 50 mm の 4 月～10 月の等価積算温度は、札幌では 200° D・D 程度であり、これは 1 週間 20°C 水中養生 (210° D・D) に相当する。従って、促進試験での修復養生方法は、修復が期待できる夏期のコンクリート内部の温湿度を考慮し、1 週間 20°C 水中養生が適切であると考えられる。

表 6 積算温度と等価積算温度

暴露地	想定部材 深さ	壁			スラブ			外気
		2mm	10mm	50mm	2mm	10mm	50mm	
室蘭	積算温度(° D・D)	5855	5888	5829	6107	6691	6172	5467
	等価積算温度(° D・D)	20	11	82	320	523	478	113
札幌	積算温度(° D・D)	6195	6198	6171	5992	5996	5991	5772
	等価積算温度(° D・D)	2033	93	289	77	74	213	59
旭川	積算温度(° D・D)	5581	5557	5616	5668	6230	7742	5216
	等価積算温度(° D・D)	456	1076	944	1779	1805	572	1410

6. まとめ

本論文では、自己修復コンクリートの開発を目的として、コンクリートの劣化・自己修復性能に影響する自然環境の評価について検討し、以下の知見を得た。

- 1) プロトタイプ自己修復コンクリートで凍害劣化後の自己修復性能を評価した結果、フライアッシュを外割り置換したコンクリートおよび早強セメントと低熱セメントの混合系のコンクリートで自己修復効果が確認された。
- 2) 高分子温湿度センサを埋め込んだコンクリート供試体を室蘭、札幌、旭川の 3ヶ所で屋外暴露して、コンクリート中の温湿度を測定し、自然環境下での自己修復性能を評価するための促進試験条件を示した。
- 3) 気象因子からコンクリート内部の温度を推定する熱収支式を示し、実測温度との関係を検討した結果、RMSE が小さく概ね対応している。

参考文献

- [1] 浜幸雄ら：高強度・高流度コンクリートの耐凍害性におよぼす凍結融解試験前の養生条件の影響，セメント・コンクリート論文集，No56 pp. 425-430, 2002
- [2] L. Tang and P.-E. Petersson：Recommendations of RILEM TC 176-IDC, Materials and Structures, Vol. 34, RILEM, pp. 526-531, 2001. 11
- [3] 松村宇ら：凍害を受けたコンクリートの劣化性状と劣化度評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No. 563 号，pp. 9-13, 2003. 1
- [4] 桂修ら：高分子湿度センサーを用いたコンクリート中の相対湿度測定 その 1 センサーの測定精度，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 1207-1208, 2005
- [5] 富板崇ら：コンクリート供試体表面温度の気象因子による推定とその応用，自然環境とコンクリート性能評価に関するシンポジウム委員会報告書・論文集，2005
- [6] 気象庁ホームページ
<http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html>
- [7] 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説，1998
- [8] 須藤由美子ら：凍結および乾燥を受けたセメント硬化体の水和反応速度と強度増進，日本建築学会構造系論文集，No. 542 号，pp. 17-22, 2001. 4

*1 (株)ビューテック

*2 室蘭工業大学助教授・博士 (工学)

*3 北海道立北方建築総合研究所

Veutech CO., LTD., M. Eng

Assoc. Prof., Muroran Institute of Technology, Dr. Eng

Northern Regional Building Research Institute